

제철 소결기 베드 내 연소 및 열전달 모델링 - 인자 변화에 의한 계산 결과 평가

양원* · 류창국* · 최상민**†

Modeling of Combustion and Heat transfer in the Iron Ore Sintering Bed - Evaluation of the Calculation Results for Various Cases

Won Yang*, Changkook Ryu*, Sangmin Choi*

ABSTRACT

Numerical simulations of the condition in the iron ore sintering bed are performed for various parameters. The sintering bed is modelled as an unsteady one-dimensional progress of solid material, containing cokes and iron ore. Bed temperature, solid mass and gas species distributions are predicted for various parameters of moisture contents, cokes contents and air suction rates, along with the various particle diameters of the solid for sensitivity analysis. Calculation results show that influences of these parameters on the bed condition should be carefully evaluated for achievement of the self-sustaining combustion without the high temperature section, which can cause the excessive melting in the bed. It suggests that the model should be extended to consider the bed structural change and multiple solid phase, which can treat the inerts and fuel particles separately.

Key Words : Sintering bed, Modeling, Bed combustion

1. 서 론

연소와 소결은 제철 소결기 베드 내에서 발생하는 중요한 물리적인 현상이다. 연료로 사용되는 코크스의 연소로 인해 발생하는 고온 영역에서는 분말 상태의 철광석(분광)의 부분적인 용융이 일어나 입자들이 서로 결합하여 직경 5 mm 이상의 소결광이 생성된다. 이렇게 생성된 소결광의 품질과 생산성은 온도와 체재 시간, 입자 크기 및 수분함량, 베드의 균일도 등에 따라 많은 차이를 나타내기 때문에 운전자의 입장에서는 이러한 인자들의 제어가 매우 중요하다[1].

Fig. 1 에는 소결기 베드 내의 현상을 개념적으로 나타내었다. 원료로부터 형성된 입자들이 별도의 장입장치에 의해 소결층에 공급된 후, 버너

에 의해 상부 표면이 착화되면 서서히 코크스의 연소가 일어나며, 이로 인해 연소대 안의 상승된 온도 분위기에서 소결이 이루어지게 된다. 연소대 아래쪽에서는 입자에 포함된 수분이 연소가스에 의해 증발된다. 그러나 연소가스가 더 아래로 진행하면서 이슬점 아래로 냉각되어 수분이 재응축되는 과정이 일어난다[1]. 이러한 일련의 과정들이 약 100 m 정도의 길이를 가지고 있는 베드에서 느린 속도로 진행된다.

고체 연료층 연소 관점에 있어서, 제철 공장에서 사용되는 소결기 베드는 약 5 %의 연료(코크스)를 제외하고 모두 불연물질로 이루어지게 된다. 이 불연물질은 주로 철광석이며, 적철광(Hematite), 갈철광(limonite), 자철광(Magnetite) 등으로 다양하게 구성되어 있다. 또한 15 % 가량의 석회석과 함께 규소(silica) 및 무용 광물(gangue) 등의 물질이 미량 포함되어 있다. 이들은 각각 다양한 입경 분포와 물리적 성상을 가지고 있다.

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락 저자, 042-869-3030, smchoi@mail.kaist.ac.kr

기 호 설 명

A : area (m^2)
 C : molar concentration ($kmol/m^3$)
 d : diameter (m)
 FFS : flame front speed (cm/sec)
 H : latent heat (kJ/kg)
 h : enthalpy (J/kg)
 h : conv. heat transfer coefficient
 h : enthalpy/unit volume (J/m^3)
 k : thermal conductivity (W/m-K)
 k : rate coefficient (/s)
 k : mass transfer coefficient (m/s)
 m : mass fraction
 n : number density ($/m^3$)
 p : pressure (Pa)
 Q : heat (W)
 q : heat per unit volume (W/m^3)
 R : universal gas constant (kJ/kg-K)
 T : temperature (K)

t : time (sec)
 v : velocity (m/s)
 W : molecular weight (kg/kmol)
 y : axial distance (m)

Greeks

ϵ : bed void fraction, internal pore
 ν : stoichiometric coefficient
 ρ : density (kg/m^3)

Subscripts

g : gas
 ip : internal pore
 o : initial
 p : particle
 r : Arrhenius reaction
 s : solid, stoichiometric

소결기 베드는 석탄 가스화기나 폐기물 소각로 내 연료층과 비교해 볼 때 비교적 연료 조성이 균일하고 층이 일정하게 이송되며 가스 유동장과 상호작용이 거의 없다. 따라서 기존의 고체 연료의 고정층 연소 모델링[2,3]을 이용한 접근이 비교적 수월한 편이며, 이에 따라 모델링을 통해 소결기 베드 내 상황과 배가스 조성을 예측하고자 하는 시도가 수행되어 왔다[1,4-9].

지배방정식은 비정상 1차원 모델로 수립되었으며, 폭 방향 및 길이 방향의 변화를 무시하고 높이 방향의 열 및 물질전달에 의해 층의 연소가 진행된다고 가정하였다. 이에 따라 기존의 연구에서와 마찬가지로 하나의 연료 열이 시간에 따라 보이는 경계조건의 변화와 내부 연소의 해석으로 단순화된다(Fig. 2).

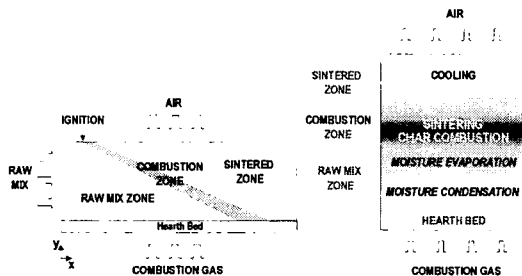


Fig. 1 Major phenomena in the sintering bed

2. 모델링

고체상과 기체상을 별도의 균일한 연속체로 보는 가정은 기존의 고체 연료층 모델에서 사용된 가정[1]과 같다. 이에 따라, 기체상과 고체상에 대하여 각각 검사체적에 의한 지배방정식의 수립이 가능하다.

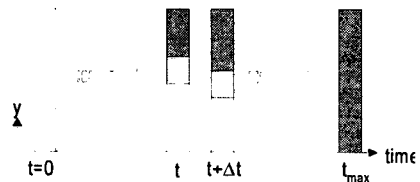


Fig. 2 Extension of 1-D unsteady model to the 2-D model

Table 1 에는 계산에 사용된 모델들을 정리하여 나타내었다. 지배방정식들은 유한체적법을 이용해 풀이되었고, 이산화(discretization)는 고체상의 경우 central differencing scheme을, 가스상은 upwind scheme을 적용하였다.

Table 1 Governing and reaction equations

	Solid phase		Gas phase
Mass	$\frac{\partial \rho_s (1-\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s}{\partial y} = \dot{M}_{s,loss}^{\#} \quad (1)$	Mass	$\frac{\partial \rho_g \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial y} = -\dot{M}_{s,loss}^{\#} \quad (6)$
Energy	$\frac{\partial (1-\varepsilon)h_s}{\partial t} + \frac{\partial v_s h_s}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left((1-\varepsilon)k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + S_{\#}$ $S_{\#} = h_{conv} A_s (T_g - T_s) + q_{rad} + q_{combustion} + q_{s,loss} \quad (2)$	Energy	$\frac{\partial \varepsilon h_g}{\partial t} + \frac{\partial v_g h_g}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + S_{\#}$ $S_{\#} = h_{conv} A_{ps} (T_s - T_g) + q_{reaction} - q_{s,loss} \quad (7)$
Component	$\frac{\partial \rho_s (1-\varepsilon) m_{s,i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s m_{s,i}}{\partial y} = \dot{M}_{comb,i}^{\#} \quad (3)$	Species	$\frac{\partial \rho_g \varepsilon m_{g,j}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g m_{g,j}}{\partial y} = \dot{M}_{reaction,j}^{\#} - \dot{M}_{s,loss,j}^{\#} \quad (8)$
Internal pore	$\frac{\partial (1-\varepsilon) \varepsilon_{ip}}{\partial t} + \frac{\partial v_s \varepsilon_{ip}}{\partial y} = -\sum_i f_{ip,i} \frac{\dot{M}_{comb,i}^{\#}}{\rho_i} + \dot{\varepsilon}_{ip,loss}^{\#}$ $\rho_s = (1-\varepsilon_{ip}) \rho_{true} \quad (4)$	Eqn. of state	$\rho_g = p / R \sum \frac{m_j}{W_j} T_g \quad (9)$
Char reaction	$\dot{M}_{char}^{\#} = A_s v_s W_{char} C_{g,i} d_p \left(\frac{1}{k_r} + \frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_{eff}} \right) \quad (5)$		

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 계산 조건 및 해석방법

Fig. 3 에는 계산에 사용된 기본적인 운전조건을 나타내었다. 기준 조건은 실제 소결로에서 사용되고 있는 운전조건을 사용하였다. 입자 크기는 3mm 로 균일하게 가정했으며, 소결이 일어나는 과정에서 입자들이 서로 결합하는 현상은 입자 크기나 공극률 및 내부 기공률에 영향을 끼치지 않는 것으로 보았다. 실제 베드에서의 공기량은 전기 집진기 이후의 팬 압력으로 조절되는데, 베드에서 발생한 연소가스 유량으로부터 공기 유속

을 역산하였다. 고온의 COG 가 베드에 영향을 끼치는 영역은 초기 4m(1.2분) 로 보았으며, 베드에서의 전체 체류시간은 약 33분이다.

Table 2 에는 해석 케이스들을 나타내었다. 크게 변화 인자는 원료의 성상과 운전조건 관련 인자로 나누어지며, 원료의 성상에서는 수분 함량과 코크스 함량을, 운전조건으로는 공기 흡입량을 바꾸어가며 해석을 수행하였다. 이와 함께, 입자 크기를 변화시키면서 민감도 해석을 수행하였다. 계산 결과의 해석을 위해서 파악되어야 할 중요한 인자로는 베드 내부에서의 온도분포 및 성분별 질량 분포와 배출 가스의 성분별 농도 분포를 들 수 있다. 또한, 연소특성을 결정하는 정량적인 인자로 연소의 진행 속도와 관련된 인자를 도입

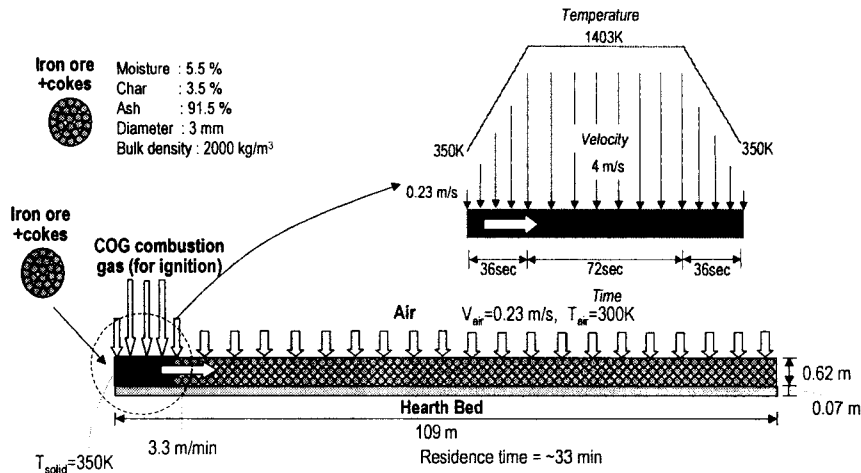


Fig. 3 Process of the sintering bed for the calculation (Reference case)

하였다. 각각에 대한 설명은 다음과 같다.

Table 2 Simulation cases

Parameter	Reference	Variations
Moisture	5.5 %	2~8 %
Cokes	3.5 %	2~7 %
Air velocity	0.23 m/s	0.1~0.7 m/s
Particle size	3 mm	1~5 mm

3.1.1 Temperature/mass distribution of the solid bed

소결 과정의 진행에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 하는 인자 중의 하나이다. 최 연소열에 의하여 연소가 계속 진행되도록 하면서 국부적으로 고온 영역이 생기지 않도록 온도 분포가 설정되어야 한다. 국부적인 고온 영역이 생기게 되면 철광석의 용융이 발생하여 공기의 통풍을 막게 되고, 이는 소결광의 품질에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 실제 제철 소결기에서는 위치별로 베드의 바닥 부분에서의 가스 온도분포를 측정하여 내부 상황을 파악하지만, 베드 내부의 온도분포를 알 수 없으므로 어려움이 있다. 모델링을 통해 내부의 온도 분포를 확인함으로써 베드 내 연소 상황을 좀더 세밀하게 파악할 수 있다. 온도분포와 함께 중요하게 파악되어야 할 인자로는 고체상의 성분별 질량 분포를 들 수 있다. 특히 최 성분의 질량 분포는 연소의 종료 시점 및 연소대가 일어나는 폭과 관련하여 파악되어야 할 중요한 인자이다.

3.1.2 Gas species distribution

제철 공정에서의 소결기 운전의 초점은 앞에서 기술한대로 양질의 소결광을 생산하는데 있으며, 온도 설정이나 연소 조건의 설정도 이를 기준으로 하여 이루어지고 있다. 그러나 최근 들어 환경 문제의 관점에서 이러한 고체 연료 연소 시스템에서 배출되는 오염물질의 규제가 증가함에 따라 저공해 운전에 대하여 많은 관심이 필요해지고 있다. 모델링을 통하여 오염물질, 특히 불안전 연소에 의한 오염물질 방출 특성을 파악할 수 있다. 연소 가스의 조성과 가스 온도 분포를 계산하여 이러한 특징을 살펴보았다.

3.1.3 Propagation of combustion

최 연소가 느리게 진행되는 베드 내의 연소 진행 기작을 고려하여, 결과 해석을 위해 열에 의해 연소가 베드 아래쪽으로 전파되는 속도를 식 (10)과 같이 정의할 수 있다. 이 인자는 전체 베

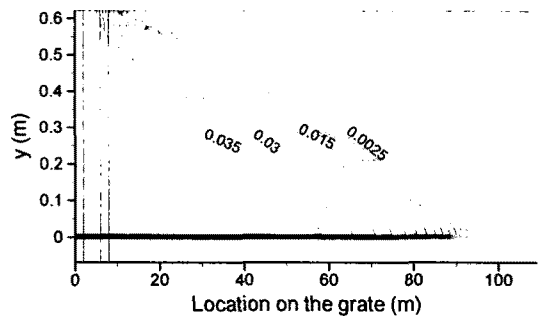
드 연소를 특징짓는 가장 중요한 인자 중의 하나이다[3]. 이를 통해 연료의 연소 특성과 물리적 성상의 변화에 따른 연소 상황의 변화를 정량화할 수 있다. 이와 함께 최 연소가 종료되는 시점을 함께 관찰하여 비교하도록 한다.

$$\text{FFS(Flame Front Speed)} = \frac{\text{Distance between two points}}{\text{Time consumed for propagation}} \quad (10)$$

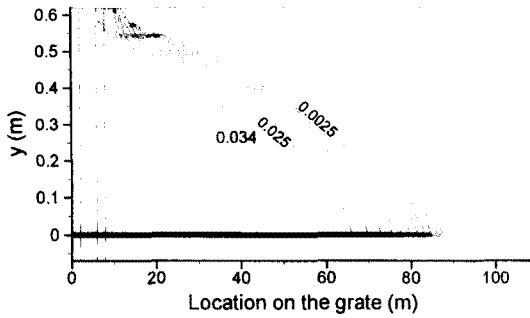
3.2 수분 함량 변화에 따른 해석 결과

Fig. 4 에는 소결기 내에 장입되는 분광의 수분 함량을 변화시키면서 고체상 내 온도분포를 계산한 결과를 나타내었다. (a)와 같이 수분이 3% 로 기준조건보다 낮을 때는 증발 잠열에 의한 열손실이 줄어들면서 FFS도 4.68 cm/min 로 기준 경우인 4.31 cm/min 보다 크게 나타나고 있다. 이를 통하여 고체상 내 수분의 함량이 연소 속도에 많은 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 수분 함량이 적을 때는 연소 진행이 빨라지고 고체상 내 연소층이 두꺼워지고 있는 반면에 (b)와 같이 초기 수분 함량이 8% 로 기준 조건보다 더 높게 설정된 경우에는 증발 잠열 손실이 커져 연소 진행이 느리고(FFS = 3.89 cm/min) 연소층의 두께도 축소되고 있다.

Fig. 5 에는 수분 농도의 변화에 따른 가스 조성 분포 변화를 나타내었다. 원료 내 수분의 함량이 증가하면서 초기에 CO가 많이 방출되고 있지만, 건조가 끝난 후에는 CO 의 연소가 더 활발하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 수분 농도가 높아지면서 산소 외에 steam 이 CO 의 연소에 참여하고 있음을 나타내는 결과이다.



(a) moisture mass fraction = 3 %



(b) moisture mass fraction = 8 %

Fig. 4 Mass fraction distribution of char for various initial moisture contents

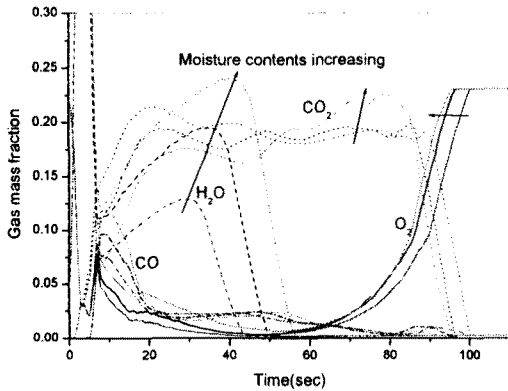


Fig. 5 Distribution of gas mass fractions for various initial moisture contents

3.2 코크스 성분 변화에 따른 해석 결과

코크스 성분은 소결기 내에서 소결에 필요한 열을 공급하는 연료이다. 소결기에 장입되기 전의 분광에 포함될 코크스 함량은 베드에서 반응이 일어나는 길이 조절의 측면 뿐만 아니라 온도 측면에서도 신중하게 결정되어야 한다.

Fig. 6 에는 분광 내 코크스 함량을 바꾸어가면서 최의 질량 분포 계산을 수행한 결과를 나타내었다. 기준량(3.5%)보다 적은 양의 코크스를 주입한 Fig. 6(a) 의 경우에는 끝까지 연소가 이루어질 수 있을 정도의 연소열은 유지되고 있지만, 연소열이 적어 연소층이 얇게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 반면에 기준량보다 많은 양의 코크스를 주입한 Fig. 6(b) 의 경우에는 최 연소 영역이 더욱 두껍게 형성되고 있으며, 연소가 베드 끝에 이르기 전에 종료되지 못하고 있다. 코크스 함량이 적을수록 연소가 일어나는 범위는 점점

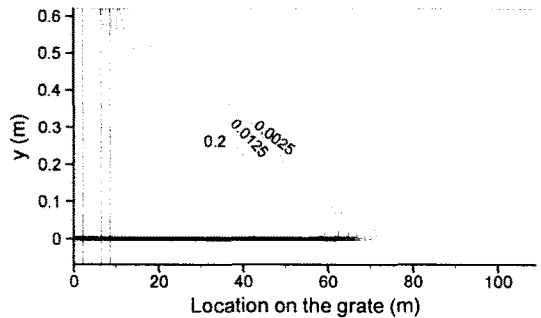
좁아지게 되며, 어느 시점에 이르렀을 때에는 화염이 소멸된다.

원료의 성상에 따른 연소 상황의 변화를 살펴본 결과, 소결광의 용융이 일어나는 고온 영역을 피하면서 내부 연소열에 의해 스스로 연소가 진행되는 self-sustaining 연소 상황을 이끌어 내는 운전 영역의 예측이 계산을 통하여 가능함을 알 수 있다. 원료 내의 수분 또는 코크스의 함량에 따라 민감하게 베드 내 상황이 변화하므로, 무연탄을 일부 사용하는 경우 등과 같은 연료 변경이 있을 때의 운전 조건이 신중하게 결정되어야 함을 확인할 수 있다. 이러한 경우 칠광석의 물리적 거동의 변화도 함께 확인하는 작업이 필요하며, 이는 향후 연구에서 보완되어야 할 부분이다.

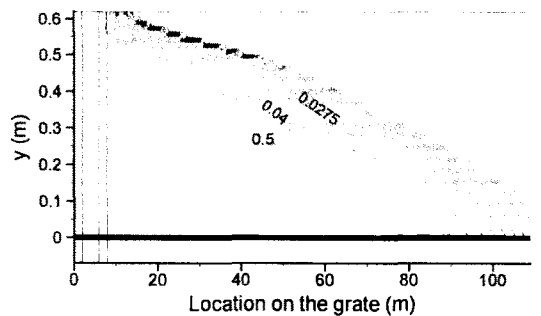
3.3 공기 흡입량 변화에 따른 해석 결과

연소기의 대표적인 운전 조건인 공기 흡입량은 연소 속도에 영향을 끼치게 되며, 이 값은 모델에서는 공기 주입 속도로 결정된다.

Fig. 7(a)에는 기준 속도(0.23 m/s) 보다 적게 공기가 주입되는 경우(0.10 m/s) 고체상 내 온도 분포를 나타내었다. 온도 분포 형태가 시간에 따라



(a) cokes mass fraction = 2%

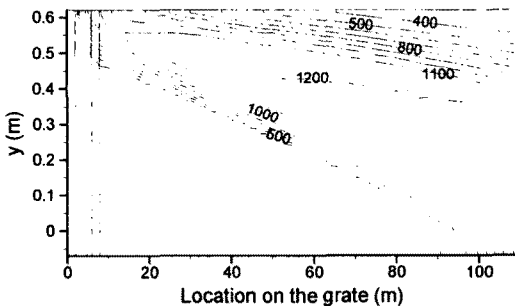


(b) cokes mass fraction = 5 %

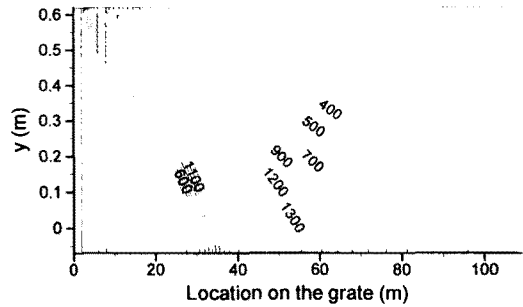
Fig. 6 Char mass fraction distributions for various initial contents of cokes

일정한 기울기로 나타나는 결과를 통해 연소가 끝까지 같은 속도로 진행되고 있으며, self-sustaining 연소 조건임을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 산소의 부족으로 인해 연소 속도가 느리게 진행되어 고체상 내 온도가 낮고, 최 연소도 다 종료되지 못하는 현상이 나타나고 있다. 이를 통하여 소결기 베드의 연소 속도가 산소량에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

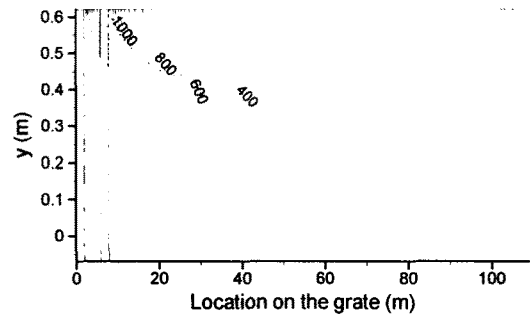
Fig. 7(b) 에는 기준 케이스보다 공기 주입량이 많은 경우에 공기 주입량을 늘려가면서 베드의 온도 분포를 계산한 결과를 나타내었다. 기준 속도보다 공기 주입량이 많으면 연소의 종료는 기준 속도에 비해 훨씬 빨리 일어나게 되며, FFS 값도 훨씬 커지게 된다(FFS = 6.98 cm/min, 0.45 m/s). 하지만, 공기 주입량을 더 늘리면, 대류 열손실에 의해 최 연소층의 두께가 얇아지고 고온 영역의 크기가 작아지게 되며, FFS 값이 작아지게 된다(FFS = 5.54 cm/min, 0.65 m/s). Fig. 7(c) 와 같이 공기 주입량이 어느 한계를 넘어가는 경우(0.7 m/s)에는 많은 공기량으로 인한 대류 열손실에 의해 최 연소 진행이 이루어지지 못하고 화염이 소멸된다. 이러한 결과를 Fig. 8 에 정량화하여 나타내었다. 산소에 의해 연소 반응이 진행되는 초기에는 공기 주입량에 비례하여 연소진행속도가 증가하게 된다(oxygen limited). 그러나 어느 영역을 지나게 되면, 연소 진행 속도가 반응에 의해 제한되고 잉여 산소가 생기게 된다(reaction limited). Reaction limited 영역에서는 잉여공기가 베드를 냉각시키게 되어 고온 영역의 크기가 작아지고, 최 연소 영역은 얇아지게 된다. 공기 주입량이 더 증가하면 대류 열손실에 의해 연소 진행이 중단된다. 기준 계산 케이스는 oxygen limited 영역에 해당되며, 이는 소결기의 운전이 연료 과잉 상태에서 일어나고 있음을 의미한다. 각 영역의 길이는 입자 크기에 따라 달라지게 되며, 특히 산소 확산에 의해 반응이 제한되는 구간의 길이는 입자 크기가 클수록 더욱 길어지게 된다[3]. 향후 연구에서 이러한 현상들에 대한 정량적인 해석이 필요하다.



(a) Air velocity : 0.10 m/s



(b) Air velocity : 0.45 m/s



(c) Air velocity : 0.70 m/s (extinguished)

Fig. 7 Solid temperature distributions for various air velocities

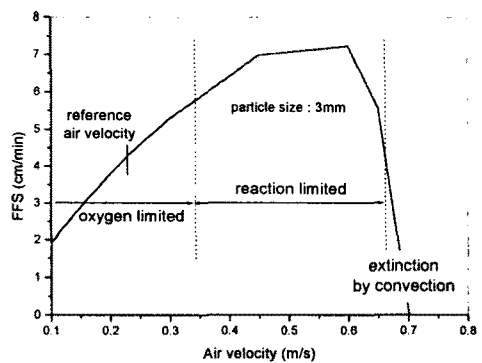


Fig. 8 Flame front speeds for various air velocities

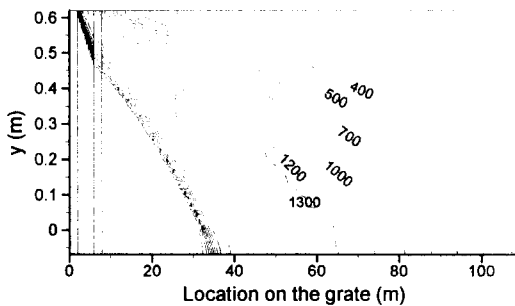
3.4 Sensitivity analysis : 입자 크기

소결 공정 전에 공급되는 철광석의 입경은 매우 넓은 범위로 분포되어 있지만, 실제 소결기에 장입되기 전의 전처리 과정에서 수분과 석회석 등

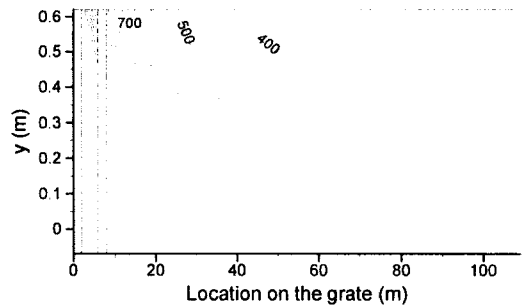
이 함께 혼합되어 압축되는 과정을 통해 의사입자(pseudo-particle)를 형성하게 된다. 이 가운데 작은 입자들이 큰 입자에 달라붙게 되는 과정을 통하여 입경 분포가 좁아진다. 하지만, 실제 장입되는 의사 입자들의 입경 역시 균일하지 않으며, 특히 코크스나 미분탄과 같은 입자들의 경우에는 평균적인 입자들의 크기보다 더 작은 입경을 가지게 된다. 그러므로, 입자들의 크기 분포에 대한 영향을 해석하여 실제 계산에 반영하는 일이 매우 중요해짐에 따라, 소결기에 장입되는 입자들의 평균 직경을 바꾸어가면서 입자 크기의 영향을 살펴보았다.

Fig. 10 에는 입자 크기가 기준치(3mm)보다 작은 경우와 큰 경우에 대하여 고체상의 온도 분포 변화를 나타내었다. 입자 크기가 작은 경우(1mm)에는 고온 영역의 크기가 커지고, FFS 값이 크게 증가하게 된다(FFS = 6.35 cm/min). 반면에, 입자 크기가 늘어나면서 이러한 현상이 줄어들고, 입자 크기가 5mm 가 될 때는 화염대가 소멸하는 현상을 보이게 된다. 이러한 결과가 나오는 것은, 다공층 내에서의 복사 열전달 침투 변화에 의한 것으로, 입자의 크기가 커지게 되면 복사열의 침투가 더 잘 일어나기 때문에 다공층 내의 radiant conductivity 가 증가하게 되지만, 입자가 작아지면 반대의 현상이 일어나기 때문에 열집중이 발생하게 되는 것이다. 따라서 계산을 수행할 때 입자 크기에 대한 정확한 정보를 가지고 있어야 함을 알 수 있다.

이러한 결과들을 통하여 소결을 포함한 불연물들의 물리적 성상의 변화에 따른 다공층에서의 유효 열전도도 변화를 정확하게 파악해야 함을 알 수 있었다. 이를 위해서는 입자 크기 변화 및 결합에 의한 void fraction 의 변화를 고려해야 할 것으로 생각된다.



(a) Particle diameter : 1mm



(b) Particle diameter : 5mm

Fig. 10 Solid temperature distribution for various particle diameters

4. 결론

소결광의 품질과 생산성은 소결기 베드 내 상황에 많은 영향을 받게 된다. 고체 연료 연소 모델링을 통해 소결기 내의 온도 분포와 연료 조성 분포를 얻을 수 있었다. 모델에 대하여 원료 조건과 운전 조건을 바꾸어 가면서 계산을 수행하였으며, 이를 통해 국부적으로 고온 현상이 발생하는 것을 방지하면서 자체 연소열에 의해 연소가 끝까지 진행되도록 하는 조건을 찾기 위한 접근 방법을 제시할 수 있었다. 또한 원료의 성상이나 운전조건에 따라 베드 내 상황의 변화가 심하기 때문에 조건 변화시에 이러한 부분을 고려해야 한다는 것을 알 수 있었다. 이와 함께 좀더 정확한 베드 내 상황 예측을 위해서 입자 크기 및 소결 현상에 의한 원료층 내 다공층 특성 변화 등에 대한 정확한 정보가 필요함을 확인할 수 있었다. 또한 고체상을 구성하는 원료들의 성분과 물리적 특성을 별도로 해석하여 국부적인 온도 예측을 좀더 정확하게 할 수 있는 다상 모델의 개발이 필요함을 확인하였다.

참고문헌

[1] 양원, 류창국, 최상민, "제철 소결공정의 철광석-코크스 베드에서의 연소와 열전달 해석", 제 23회 KOSCO Symposium 논문집, 2001, pp. 161-168.
 [2] M. L Hobbs., P. T. Radulovic, and L. D. Smoot, "Combustion and Gasification of Coals in Fixed Beds", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, 1993, pp. 505-586.
 [3] D. H. Shin, and S. Choi "The Combustion

- of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed", *Combust. and Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 167-180.
- [4] I. Muchi and J. Higuchi, "Theoretical Analysis on the Operation of Sintering", *鐵と鋼*, Vol. 56, 1970, pp. 371-381.
- [5] Y. Hosotani, M. Fujimoto, N. Konno, T. Okada and J. Shibata, "Influence of Oxygen and Humidity of Inlet Gas on the Sintering Reaction", *鐵と鋼*, Vol. 83, 1997, pp. 7-12
- [6] M. J. Cumming, and J. A. Thurlby "Developments in Modelling and Simulation of Iron Ore Sintering", *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 17, 1990, pp. 245-254
- [7] F. Patisson, J. P. Bellot, D. Ablitzer, E. Marlière, C. Dulcy and J. M. Steiler "Mathematical Modelling of Iron Ore Sintering Process", *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 18, 1991, pp. 89-95
- [8] N. K. Nath, A. J. Da Silva and N. Chakraborti, "Dynamic Process Modelling of Iron Ore Sintering", *Steel Research*, Vol. 68, 1997, pp. 285-292
- [9] M. V. Ramos, E. Kasai, J. Kano and T. Nakamura, "Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed", *ISIJ Int.* Vol. 40, 2000, pp. 448-454